Fotogeología

RAÚL N. DESSANTI

(Buenos Aires, Argentina)

La fotografía aérea ha sido y es utilizada en muchos países, primeramente, para la confección de mapas topográficos. La nueva técnica, en comparación con los métodos clásicos, permite mayor rapidez, precisión y economía, a la par que ahorra energías humanas especialmente en ciertas áreas de tránsito difícil, inhóspitas o insalubres.

La necesidad de mayor eficiencia obliga a la formación de técnicos especializados. Nace y se desarrolla así la *Fotogrametría* una rama de la Ingeniería Civil que permite la preparación de mapas topográficos exactos a partir de las fotografías aéreas.

Paralelamente con el perfeccionamiento de los aviones se inventa y perfecciona un complejo y costoso instrumental el cual es requerido para la toma de las fotografías, la corrección de sus inevitables errores, y para su utilización en la preparación de los mapas topográficos.

Con la existencia de las fotos aéreas, cuyas copias son suministradas por las dependencias estatales o por las compañías privadas a un costo relativamente insignificante, se estudian otras posibilidades de la utilización de éstas. Nace y se perfecciona así, la *Fotointerpretación*, definida por Colwell (1952) como: "el acto de examinar las imágenes fotográficas de los objetos con el propósito de identificar a éstos y deducir su significado". La *Fotogeología*, una rama de la Fotointerpretación, es la técnica de obtener información geológica a partir de las fotos aéreas.

La Fotogeología, al contrario de lo que algunos *expertos* se encargan de difundir, es un auxiliar valioso, una herramienta de trabajo, pero nunca un sustituto de las investigaciones geológicas en campaña (Dessanti, R. N. 1954, *Ciencia e Investigación*, 10, 109-118)|

En otras palabras, las observaciones realizadas sobre las fotos aéreas deben ser controladas y complementadas con otras observaciones a realizar sobre el terreno. Primero, se estudian las aerofotos y se compila un mapa geológico preliminar en el cual con diferentes símbolos se indican los hechos suficientemente comprobados y los que, en cambio, requieren observaciones adicionales sobre el terreno. Estos mapas fotogeológicos proveen además una base para la planificación de las investigaciones, itinerarios a seguir, sitios más apropiados para realizar observaciones, etc.

Durante el desarrollo de las investigaciones sobre el terreno se continúan utilizando las fotos aéreas. En esta fase, es posible correlacionar los objetos geológicos con sus imágenes fotográficas, y con ello se orientan futuras investigaciones. Además, algunos prefieren dibujar directamente sobre las aerofotos los contactos de las formaciones, y otras líneas geológicas, en vez de hacerlo sobre los mapas topográficos. Para ello, observan las fotos aéreas con la ayuda de un estereoscopio de bolsillo. El método es recomendable cuando los contactos están controlados por rupturas de pendiente, no claramente indicadas en el mapa topográfico y, en cambio claramente reconocibles en las fotografías.

Nº 1-2 Ciencia e investigación.

Las partes rayadas indican las regiones del país que han sido cubiertas con aerofotografías y las instituciones que las han tomado.

En nuestro país recién en los últimos años se han empezado a utilizar las fotografías aéreas, que ya alcanzan a cubrir importantes superficies (Figura 1).

Teniendo presente este hecho, durante el año 1961, me trasladé a los Estados Unidos, y dediqué gran parte del tiempo disponible en realizar investigaciones fotogeológicas bajo la dirección del Profesor Dr. Laurence H. Lattman, en la Pennsylvania State University. Para ello conté con una beca otorgada por la Fundación John S. Guggenheim, y además con el apoyo de la Dirección Nacional de Geología y Minería y la Facultad de Ciencias Naturales y Museo de La Plata.

A mi regreso al país he considerado que debía comunicar algunos resultados del estudio realizado pero, lamentablemente el tema no se presta para ser desarrollado en conferencias, o sobre el papel sino, más bien en el laboratorio, mostrando las fotografías bajo el estereoscopio. Por lo tanto, he decidido presentar solamente un panorama general del asunto, y adjuntar la bibliografía que juzgo más importante y accesible, a fin de que el lector pueda eventualmente profundizar en los temas de su interés. Esta nota cumplirá su cometido si puede ayudar al mayor número de lectores a entender cuál es el alcance y las limitaciones de la técnica fotogeológica.

Antes de entrar más en el tema deseo agregar dos palabras respecto al instrumental requerido, ya que he podido comprobar que un gran número de personas generalmente piensa que para analizar fotografías aéreas se necesita contar con grandes laboratorios y un complicado instrumental. Ambas cosas se requieren indudablemente cuando las fotos aéreas son usadas en Fotogrametría, pero en Fotogeología, en cambio, el instrumental requerido es muy sencillo. El instrumental esencial es el estereoscopio (hay varios tipos) y un instrumento adecuado para medir diferencias de paralaje, las que a su vez permiten medir diferencias en elevación y con ellas medir ángulos de buzamiento, espesor de formaciones, etc. Además, generalmente se usa un proyector, de los cuales hay varios tipos, siendo el llamado Sketchmaster el más sencillo de entre ellos.

En la obra de Ray (1960) y en los textos mencionados en la lista adjunta, el lector encontrará ilustraciones e indicaciones sobre el uso de dichos instrumentos.

Elementos utilizados en Fotointerpretación. — Los elementos utilizados en fotointerpretación son los siguientes:

1) Tono
2) Color
3) Textura
4) Trama (*Pattern*)
5) Drenaje
6) Forma
7) Vegetación.

Tono. — Varía en función de la cantidad de luz reflejada por los objetos y registrada en las fotos, con variaciones que van desde el blanco hasta el negro, a través de tonalidades del gris. El tono depende de varios factores tales como la hora y mes en que se tomó la fotografía. Pero, no bastante, resulta un elemento útil en fotointerpretación, especialmente si se usa combinado con otros elementos.

Color. — El ojo humano puede distinguir muchas veces más variaciones entre la gama de colores, que entre los tonos comprendidos entre negro y blanco. Por lo tanto, las fotografías en colores brindan grandes posibilidades. Pero, la fotografía en colores está todavía en su fase experimental, y por lo tanto sus aplicaciones son actualmente limitadas.

Textura. — Queda determinada por la disposición de las variaciones de tonalidad causadas por objetos demasiado pequeños por su naturaleza o por la escala, para permitir su identificación. Muy frecuentemente aparecen en las fotografías aéreas trazos rectos o ligeramente curvos que se designan *lineamientos*, y que pueden ser la expresión de estructuras geológicas tales como estratificación, diques, fallas, diaclasas, etc.

Trama - (Pattern). — Se usa en el sentido del ordenamiento espacial de los mismos rasgos mencionados en el párrafo anterior, y pueden suministrar un elemento muy característico y por lo tanto valioso.

TIPO DE CARCAVA	PERFIL TRASVERSAL	PERFIL LONGITUDINAL	PLANO	FORMAS ASOCIADAS
Cárcavas arcillosas sobre sedimentos plásticos	 hasta 20m de profundidad	 gradiente uniforme longitud hasta más de 1km	 recorrido largo, sinuoso gran número de tributarios	terrazas, lacustres, marinas, etc.
Cárcavas loésicas sobre loess, arcilla - arena ceniza volcánica?	 angosta y profunda 	 gradiente compuesta 	 cabeceras en forma de anfiteatro pedestales, bordes recortados, etc.	llanuras
Cárcavas guijarrosas gravas aluviales morenas, etc.		 gradiente fuerte recorrido corto	escasos y cortos tributarios recorrido zigzagueante alrededor de grandes bloques caidos desde ambos lados	conos y terrazas aluviales

FIG. 2. — *Cárcavas y sedimentos clásicos asociados. (Tomados del D. J. Belcher.)*

Drenaje. — La red de drenaje es un elemento importante en la interpretación geológica de las fotos aéreas. En ciertas áreas el trazado de la red de drenaje depende principalmente de la litología y estructura del subsuelo. Las características de las cárcavas (*gullies*) depende de la naturaleza del manto superficial de depósitos modernos no consolidados y permite, en combinación con otros caracteres, juzgar sobre la naturaleza de dichos depósitos (Belcher, 1948). Ver los diferentes tipos de cárcavas en la Figura 2.

Forma. — Las formas del terreno son particularmente útiles para juzgar los caracteres de las rocas donde éstas se han formado. Entre las formas de relieve más típicas tenemos los conos volcánicos, los médanos, las terrazas, fluviales, etc. En otros casos, pueden reconocerse estructuras tales como fallas, diaclasas, estratificación y otras.

Vegetación. — Las diferentes especies vegetales pueden identificarse por su forma, o por la luz que reflejan, y por las diferentes tonalidades con que aparecen en las fotografías. Muchas veces la vegetación se vuelve más abundante en donde el suelo contiene mayor humedad, y esto a su vez es el resultado de la presencia de mayor permeabilidad primaria o secundaria. En otros casos, en zonas húmedas de abundante cubierta vegetal, resulta significativa la presencia de ciertas áreas desprovistas de todo vestigio de ella, lo que puede indicar la presencia de ciertos elementos venenosos como por ejemplo, el cobre.

Combinación de elementos. — Si bien cada elemento, separadamente considerado, resulta insuficiente para la identificación de rocas o estructuras, su valor se encuentra reforzado cuando varios elementos se combinan entre sí. Así, por ejemplo, la estratificación puede reconocerse seguramente por una asociación del tono, textura, topografía y drenaje.

Identificación de rocas. Rocas Sedimentarias Consolidadas. — En este caso la identificación de la estratificación es el criterio esencial. La estratificación en una sucesión de estratos de desigual resistencia a la erosión general tiene expresión topográfica. Así por ejemplo, si las capas son horizontales se producen líneas de ruptura de pendiente que corren paralelamente a las curvas de nivel. Si los estratos están moderadamente inclinados dan lugar a la formación de cuestas y lomos de chancho (*hogbacks*).

Areniscas. — Topografías: lomas con cumbres redondeadas y laderas de fuertes pendientes.

Drenaje: grueso a mediano.

Erosión: escasa formación de cárcavas.

Tono: claro generalmente (esto no constituye una regla general).

Trama: generalmente presentan característicos sistemas de fracturas bien identificables en regiones áridas.

Observaciones: Pueden confundirse con otras rocas homogéneas, por ejemplo, rocas graníticas; se distinguen porque éstas últimas no muestran estratificación, y presentan red de drenaje dendrítica bien desarrollada. Además, la topografía es más accidentada y las lomas presentan crestas bien desarrolladas.

Lutitas, argillitas, limolitas. — Topografía: suavemente ondulada, pendientes convexas (lutitas, argillitas) o cóncavas (limolitas).

Drenaje: dendrítico, mediano a fino.

Erosión: formación de numerosas cárcavas de un tipo característico (ver figura 2).

Tono: gris mediano.

Calizas. — Topografía: en clima húmedo presentan numerosos pozos de hundimiento (*sinkholes*), y a veces alineados, secos o con agua. Relieve llano o suavemente ondulado. En clima árido las calizas son muy resistentes a la erosión.

Drenaje: grueso o ausente en clima húmedo indica drenaje subterráneo.

Tono: claro.

Rocas Sedimentarias no Consolidadas. — En estos casos los elementos para la fotointerpretación son proporcionados principalmente por las formas del terreno asociadas con los diferentes tipos de depósitos sueltos o poco consolidados (dunas, conos aluviales, terrazas fluviales, etc.).

El trazado de la red de drenaje tam-

bién aporta un elemento importante para la identificación de ciertas formaciones (red de drenaje paralela o pinnada en loess, etc.).

Pero, quizá el elemento más útil lo proporciona el estudio de la erosión y tipo de cárcavas, que permite una distinción entre depósitos arcillosos, limosos y de grano grueso (ver cuadro adjunto). (Fig. 2.)

Rocas Eruptivas. Rocas Plutónicas. — Topografía: accidentada, pendientes de mayor ángulo en la mitad inferior de las elevaciones.

Drenaje: dendrítico.

Erosión: cárcava de tipo clástico grueso en suelos desarrollados sobre plutonitas con cuarzo; cárcavas tipo *arcilloso* indican variedades feldespáticas bajo clima húmedo).

Tono: claro indica un alto contenido en cuarzo; más oscuro un alto contenido en feldespato.

Trazas de fracturas: generalmente muestran distribución al azar.

Rocas Volcánicas. — Topografía: las coladas de lavas presentan generalmente una superficie llana e inclinación regional débil. A veces se observan ampollas en las lavas, o superficie rugosa. Los bordes de las mesetas frecuentemente presentan deslizamientos.

Drenaje: grueso, localmente desordenado, regionalmente paralelo.

Tono: oscuro en basaltos, claro en andesitas y riolitas; a veces se presentan arenas eólicas sobre las coladas de basalto en regiones áridas, que aparecen con tonos claros.

Rocas Metamórficas. Esquistos, migmatitas. — Topografía: accidentada (dónde no existe una cubierta de suelos); alineación subparalela de las elevaciones pero no extendida por trechos largos.

Drenaje: fino a mediano, dendrítico y angular, localmente paralelo y controlado por la esquistosidad.

Erosión: Cárcavas tipo "limoso".

Tono: claro a medio gris.

Textura: bandeada característica.

Identificación de estructuras. Estratificación horizontal. — Estratos de diferente litología aparecen en las fotos aéreas con diferente tonalidad. Cuando en una sucesión de estratos las diferentes rocas alternan entre sí y tienen una disposición horizontal, o próxima a ésta, los límites de las fajas de igual tonalidad tienen un recorrido aproximadamente paralelo a las curvas de nivel.

Si en la sucesión de estratos se presentan rocas de diferente resistencia a la erosión, se desarrollan pendientes más fuertes en las rocas más resistentes, y pendientes de menor ángulo en las rocas menos resistentes. En estas condiciones las líneas que pasan por las características rupturas de pendiente corren paralelas a las curvas de nivel.

A causa de la homogeneidad que presentan las rocas sedimentarias en los estratos de posición horizontal se desarrolla una red de drenaje dendrítica, siempre que no existan fracturas u otro tipo de control estructural. Sin embargo, una red de drenaje de tipo dendrítico, también se desarrolla en otras rocas de composición homogénea, como por ejemplo, el granito.

Estratos inclinados. — Las formas determinadas por la acción de la erosión en estratos inclinados, permite estimar el ángulo de buzamiento de la estratificación. En estratos que presentan una inclinación de hasta 15 grados se desarrollan las características *cuestas.* Cuando el ángulo de buzamiento es mayor de 15 grados pero menor de 45 grados, se forman lomas asimétricas.

El ángulo de buzamiento puede medirse en las fotos aéreas por varios métodos, de los cuales quizá el más empleado es el descrito por Desjardins (1950). O bien puede ser estimado simplemente por la observación de las fotos aéreas. Pero, hay que tener presente que cuando se observan fotos aéreas siempre aparece exagerada la escala vertical, y por ello los buzamientos parecen mayores de lo que son en realidad.

En los casos en que el buzamiento de los estratos está expresado por rupturas de pendiente y bandas de diferente tonalidad, puede ser determinado por medio de la conocida *Regla de la V.*

En áreas donde los estratos afectan una estructura de suave plegamiento, y don-

de los estratos están en grandes extensiones cubiertos por depósitos superficiales y vegetación, el análisis de la red de drenaje proporciona indicios muy útiles para revelar el buzamiento de las capas del subsuelo. Los tributarios de recorrido más largo son los que corren paralelamente a la dirección del buzamiento de los estratos (*tributarios resecuentes*). Los tributarios relativamente más cortos, en cambio, son los que corren sobre el flanco de mayor pendiente de las lomas asimétricas (*tributarios obsecuentes*).

Pliegues. — El análisis de la red de drenaje suministra información útil para identificar y localizar estructuras de plegamiento tales como anticlinales, sinclinales, domos, etc., en áreas de escasos afloramientos y/o cubiertas por la vegetación. Así por ejemplo, una red de drenaje *tipo parral* (*trellis type*) indica una estructura de pliegues abiertos y paralelos. Una red de drenaje de *tipo anular* indica un domo, etcétera.

El análisis de la red de drenaje a veces permite descubrir anomalías que generalmente reflejan ciertas estructuras ocultas. Así por ejemplo la aparición de 2-3 meandros en cierto lugar de un cauce fluvial que carece de ellos a lo largo de su extenso recorrido generalmente indica la presencia de una "altura" estructural.

También el análisis topográfico permite muchas veces descubrir anomalías relacionadas con estructuras ocultas. Así por ejemplo, la presencia de alturas topográficas en regiones de hundimiento general, como por ejemplo, la Costa del Golfo de México, ha permitido localizar domos de sal. Las elevaciones del terreno aún cuando no pasen de los 10-20 metros de desnivel, se reconocen fácilmente en las fotos aéreas observadas bajo el estereoscopio a causa de la exageración de la escala vertical. En cambio, son difíciles de observar directamente sobre el terreno.

Fallas, diaclasas, diques. — La observación de las fotos aéreas en escala grande permite frecuentemente descubrir trazos rectos o ligeramente curvos de longitud variable, que son conocidos bajo el nombre de *lineamientos*. Algunas veces dichas líneas representan *trazas de fracturas* (fallas y diaclasas) o diques eruptivos, directamente identificables por la observación de las fotografías. En otros casos, el origen de los lineamientos no es identificable directamente en las fotos aéreas, debiendo ser investigado sobre el terreno.

Las fallas de ángulo grande generalmente se observan muy bien en las fotos aéreas debido a que éstas abarcan una superficie de terreno más extensa que la que generalmente puede observarse desde cualquier punto sobre la superficie. Su naturaleza queda identificada si puede observarse un desplazamiento de otras estructuras (estratos, diques, etc.), a ambos lados de su recorrido. Debemos abstenernos de marcar fallas a lo largo de una línea que aparece en la fotografía, a menos de haberse podido establecer claramente su naturaleza.

Muchas de las líneas que aparecen en las fotos aéreas pueden representar disclasas, especialmente si guardan paralelismo entre sí. Sin embargo, para una segura identificación la dirección de las líneas fotográficas se compara con la que presentan las diaclasas observables directamente en las rocas aflorantes en la misma área (Lattman, 1958). Una vez establecida la identidad de las líneas de las fotografías con las diaclasas de las rocas de una determinada región, pueden ser utilizadas para completar el relevamiento en donde las rocas están cubiertas por depósitos superficiales y/o vegetación, etc.

Los diques están constituídos por rocas eruptivas que según su naturaleza y las condiciones climáticas de la región pueden presentar mayor o menor resistencia a la erosión que las rocas que intruyen, dando lugar a elevación o depresiones lineales. Además, según su coloración puede dar lugar a variaciones en el tono fotográfico.

Discordancias. — Las discordancias angulares pueden ser sugeridas por una ausencia del paralelismo de la estratificación a ambos lados de la traza de la antigua superficie de erosión. Pero, en muchos casos se requerirán observaciones complementarias en el terreno para deci-

dir si se trata de una discordancia o una falla, o estratificación entrecruzada.

Las discordancias paralelas son muy difíciles de observar en las fotografías. Sin embargo, en áreas donde existen marcadas diferencias litológicas en las formaciones situadas por debajo y por arriba de una superficie de erosión, puede evidenciarse la presencia de una discordancia en base a la distribución areal de dichas formaciones.

Bibliografía Seleccionada

Am. Soc. Photogrammetry: *Manual of Photogrammetry, Washington*, D. C. (1952).

Belcher, D. J.: *Determination of soil conditions from aerial photographs; Photogrammetric Engineering, 14*, 482-88 (1948).

Blanchet, P. H.: *Development of fracture analysis as exploration method; Am. Assoc. Petroleum Geologists, Bull., 41*, 1748-59 (1957).

Colwell, R. N.: *Photographic interpretation for civil purposes* en *Manual of Photogrammetry*, 535-602 (1952).

Colwell, R. N.: *A systematic analysis of some factors affecting photographic interpretation, Photogramm. Eng.*, 20, 433-54 (1954).

Daehn, R. E.: *A standardized tone scale as an aid in photo interpretation; Photogramm. Eng., 15*, 287 (1949).

De Blieux, Ch.: *Photogeology in Gulf Coast exploration; Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull., 33*, 1251-59 (1949).

Desjardins, L.: *Techniques in photogeology; Am. Assoc. Petroleum Geologist Bull., 34*, 2284-2317 (1950).

Desjardins, Ch.: *The measurement of formational thickness by photogeology; Photogramm. Eng., 17*, 821-830 (1951).

Eardley, A. J.: *Aerial photographs-their use and interpretation.* Harper and Bros., editores, New York.

Elliot, D. H.: *Photogeologic interpretation using photogrammetric dip. calculations; California Division of Mines, Spec. Report, 15* (1952).

Fischer, W. A.: *Color aerial photography in photogeologic interpretation, Photogramm. Eng., 24*, 545-49 (1958).

Horton, R. E.: *Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology; Geol. Soc. America Bull, 56*, 275-370 (1945).

Howe, R. H. L.: *Procedures of applying air photo interpretation in the location of ground water; Photogramm, Eng., 24*, 35-49 (1958).

Johnstone, W. E.: *Photogeology and mineral exploration; Mining Mag., 88*, 265-270 (1953).

Lattman, L. H.: *Tecnique of mapping geologic fracture traces and lineaments on aerial photographs; Photogramm. Eng., 24*, 568-576 (1958).

Lattman, L. H. y Nickelsen, R. P.: *Photogeologic fracture trace mapping in Appalacian Plateau; Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull, 42*, 2238-2245 (1958).

Lattman, L. H. y Olive, W. W.: *Solution widened joints in Trans Pecos, Texas; Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull., 39*, 2084-87 (1955).

Lueder, D. R.: *Airphoto interpretation as an aid in mineral reconaissance and development; Photogramm. Eng., 19*, 819130 (1953).

Kupsch, W. O. y Wild, J.: *Lineaments in the Avonlea area, Saskatchewan; Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, 42, 127-134 (1958).

Melton, F. A.: *Problems of the photogeologist in flatland regions of low dip; Photogramm. Eng., 22*, 52-63 (1956).

Parvis, M.: *Drainage pattern significance in airphoto identification of soils and bedrocks; Photogramm. Eng., 16*, 387-409 (1950).

Putnam, W. C.: *Aerial photographs in geology; Photogramm. Eng., 13*, 557-565 (1947).

Ray, R. G.: *Aerial photographs in geologic interpretation and mapping U. S. Geological Survey, Profesional Paper 373*, Washington, D. C.

Ray, R. G. y Fischer, W. A.: *Quantitative photography-a geologic research tool; Photogramm. Eng., 26*, 143-50 (1960).

Smith, H. T. U.: *Aerial photographs and their interpretation*, Appleton Century Crofts, Inc. editores, New York.

Tator, B. A.: *Some applications of aerial photographs to geographical studies in the Gulf Coast regions; Photogramm. Eng., 17*, 716-25 (1951).

Tator, B. A.: *Drainage anomalies in coastal plains regions; Photogramm. Eng., 20*, 412-17 (1954).

Tator, B. A.: *The aerial photograph and applied geomorphology; Photogramm. Eng., 24*, 549-61 (1958).

Zonneveld, J. I. y Cohen, A.: *Geological reconnaissance; Photogramm. Eng., 18*, 151-57 (1952).